科学読本

音とオーディオ(13)

平田能睦

12章：これから先のこと

気になることはたくさんありますが，天気，経済，地震は人々が気にする共通の項目です．これから先どうなるかわかるなら，それ相応の備えをすることができます．予報，予測，予知はいずれも予（あらかじめ），つまり“前もって”という語が頭に付いていることから，これらは何であれ，未知のことを推論することと関係します．

ブラウン運動と市場価格

顕微鏡を使って花粉粒が水中で小刻みに揺れ動いていることを発見したのは，生物学者のロバート・ブラウンで，1827年のことです．

アインシュタイン（A. Einstein，1879～1955）はこのブラウン運動を説明する理論を発表し，そこで水の分子の大きさを算出するとともに，水を構成する原子の特性を予測しました．他の科学者たちはこうした予測を土台として，いまでは小学生も知っている原子の存在に関する疑念を除きました．

アインシュタインは26歳の1905年に，4つの論文を発表しています．3月に，光電効果に関する論文で光はエネルギーの粒子とも考えられることを示しました．これは後にフォトン（光子）と呼ばれます．5月は前述のブラウン運動に関する論文，6月は特殊相対性理論で，宇宙全域で一定のものは時間ではなく，光の速度である，というものです．そして9月，世界を変えた$E=mc^2$の公式の記された論文です．

ところで，市場価格の変動はブラウン運動のように予測できない，ということを示したのはポアンカレ（J. H. Poincaré，1854～1912）の弟子のバシュリエです（「フーリエ解析」T. W. ケルナー）．株価や為替レートなどの市場価格の変動予測の研究にかなりの時間とお金が費やされてきたにもかかわらず，バシュリエの理論的予測を否定できる成果がいまだに得られないことは，その理論的予測が正しいことを証明しているようです．

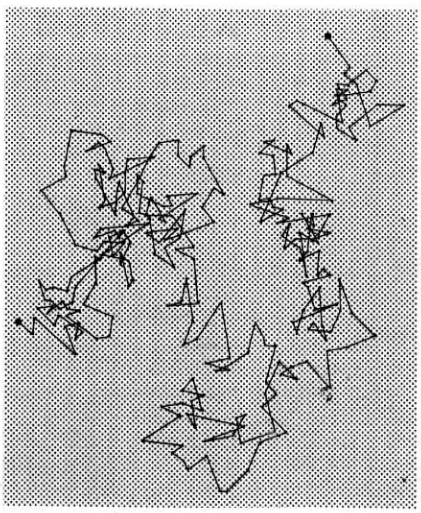
さて，こうした話がオーディオと何の関係があるのでしょうか．真っ赤ないちごが載ったショートケーキを買う人は，すぐ隣に並んでいるマロングラッセやエクレアも見るのではないでしょうか．

CDのエラー補正，デジタル・フィルタの設計，市場価格の予測――これらは数式というショーケースの中ではすぐ隣に並んでいます．

計量経済学の本を開くと，MA（移動平均），AR（自己回帰），ARMA（自己回帰・移動平均）などの略語が目に入ります．MAは非巡回形フィルタ，ARは巡回形フィルタ，1次のARMAはバイリニア，2次はバイクァドラティック・フィルタに対応し，これらを用いた予測は，エラー補正において端の値を推定する問題となり，予測誤差を小さくする係数の与えかたは，通常ハイパス・フィルタの設計に帰着します．

エラー補正に関する研究からわかるのは，MAやARなどによる予測は誤差の累積がいちじるしく，長期予測には役に立たないということです．

市場価格の変動がブラウン運動（ランダム雑音）のようなものであるなら，どのような方法であれ，その先の値を予測することはできません．予測できる変動には規則性があります．その規則がどのようなものであるか探すことが予測の研究で，規則がないとわかれば，それも1つ



●〈12・1図〉ブラウン運動（Perrin，1922）

の成果になります.

信号処理でコンピュータは大活躍ですが，コンピュータよりも人間の方が賢いことを波形の予測を例にとって示しましょう.

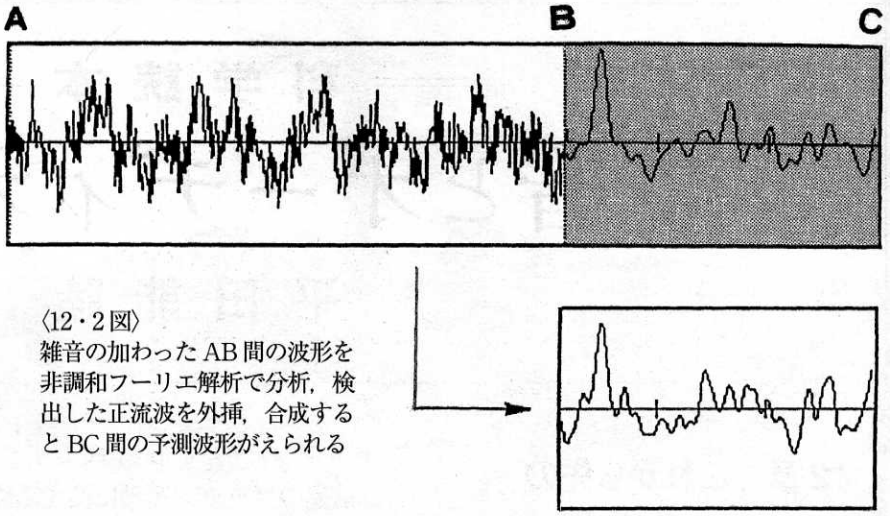
波形の予測

正弦波が1つ描かれているとします．その波形の少し先のところを予測して画くことは，「きれいに」といわれなければ誰でもできます．しかし，これをコンピュータで行なうのは簡単ではありません.

正弦波の振幅，周期，位相がわかればその先は計算してすぐに示すことができますが，この3つの値がわからないと手も足も出ません．そこで少し手伝ってあげましょう.

正弦波の周期と位相を教えれば，振幅はいくつかの値の中から最小2乗法を使って最も近いものを求めることができます．これは人間の目に頼る方法なので，つぎはコンピュータだけでやりましょう.

振幅と周期と位相にそれぞれ100個の値を与えて，これら3つ1組で決まる正弦波の中から描かれた正弦波に最も近いものを選び，それで合格とします．この場合は2つの正弦波の値の差（誤差）を2乗して和を求める計算を100万回行なうことになります.

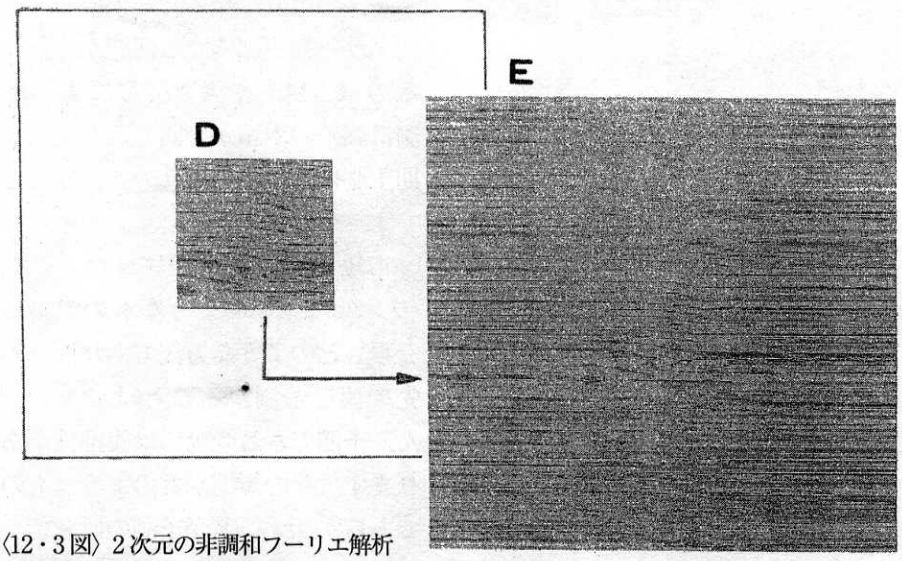


〈12・2図〉
雑音の加わったAB間の波形を非調和フーリエ解析で分析，検出した正流波を外挿，合成するとBC間の予測波形がえられる

では，もう少し精度を上げて振幅の値を1000個，周期の値を1000個，位相の値を360個としましょう．計算方法は上記の場合と同じですが，計算の回数は3億6千万回になります.

コンピュータは人間の命令に従い，何回でも計算します．しかしコンピュータをもう少しじょうずに使わないと，人間の方が賢いといっても説得力がありません

少しじょうずに使うと，3億6千万回の計算を1000回に減らすことができます．さらにじょうずに使うと，その計算を10回ほどで終えることができます.



〈12・3図〉2次元の非調和フーリエ解析で木目Dの上下左右を予測したところ，大きな板の木目Eがえられた

描かれた波形が正弦波1つなら目で簡単に先のところを予測できますが，正弦波を4つも加え合せた波形になると，特別な場合を除いて予測は困難です．しかし，コンピュータの助けを借りてじょうずな方法で行なえば，かなり複雑な波形になっても予測することができます．当然なことですが，これは示された波形が適当な数の正弦波で合成されたものと仮定できる場合の話です.

波形予測の鍵は周波数分析です．分析精度が高いほど予測の精度は高くなります.

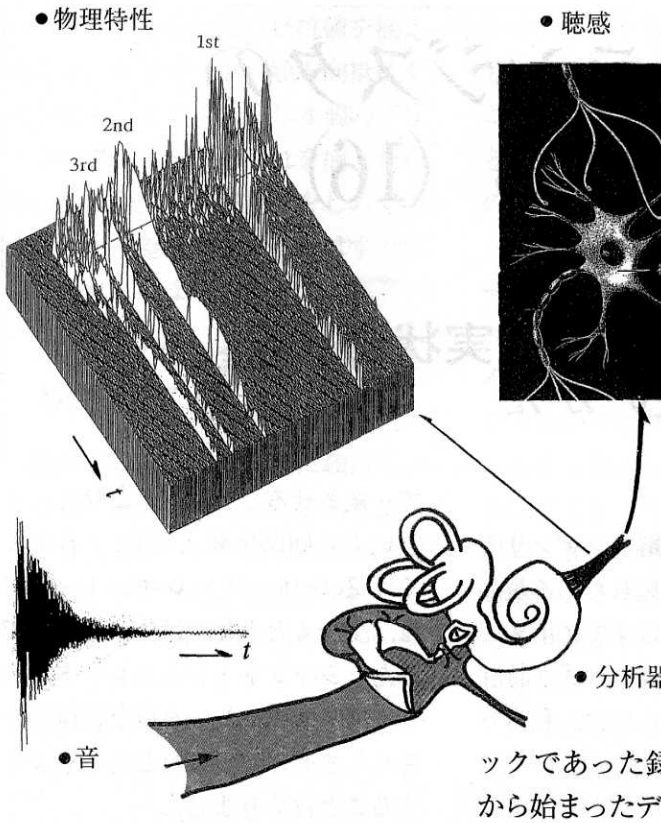
聴感と物理特性

話を「音とオーディオ」に戻し，ここで聴感と物理特性について考えましょう.

耳に入った音は鼓膜の振動に変換されて，耳小骨により内耳へ伝えられます．内耳のリンパ液に充たされた蝸牛の管の中を圧力波となって進む音は，基底膜にうねりを生じさせると，コルチ器官の数千もの感覚有毛細胞により電気化学的インパルスに変換されます.

この無数のインパルスはコルチ器官で符号化され，3万本の神経線維で形づくられた聴神経によって脳に伝達されます.

鼓膜から内耳までの容積は



〈12・4図〉
聴覚系では物理特性の時変スペクトルと聴覚は完全に対応している

16 cm^3，内耳の小指の先ほどの大きさの蝸牛は，人間の体の中でもとりわけ繊細なメカニズムで構成されている音の分析器です．この分析器から昼夜休みなく脳に送り出されているのは時々刻々変化する音のスペクトルです．これが脳で解釈され，美しい音とかうるさい音，という聴感を生じます．

耳の奥に保護されているこの分析器の出力を直接取り出すことはいまのところできませんが，その出力の時変スペクトルは主観の入らない物理量です．聴感で美しいと判断される音色には，それ相応の美しい時変スペクトルのパターンが生じているに違いありません．

聴感量をじょうずにいい表わせないとしても，耳の中では聴感とこのような物理特性は完全に対応しています．

数十年にわたり耳の分析器を使って，技術者はよい音を追求してきました．アンプもスピーカも高い完成度に達しています．オーディオのネックであった録音系は，1970年代から始まったデジタル化により大きな変化と進歩を遂げ，ヒス・ノイズは過去のものとなりました．

とはいえ，デジタル化によってすべてアナログよりもよくなったというわけではありません．CDの再生音はどこまで向上するのでしょうか．CDの音が，70年代の初めにダイレクト・カッティングで作られたLPレコードの音を凌ぐ日が来るでしょうか．これから先のことはわかりませんが，期待して待つことにしましょう．(完)

読者のみなさんへ

音とオーディオのお話――音の物理の基礎から最先端の科学技術までをわかりやすく説明するように努めました．

先入観に捕われずに自由に思い巡らし，論理的に考えることから新しい原理が見い出され，発明が生み出されます．独断は知識を締め出し，偏見は思考を妨げます．科学は幼い子供が抱くような疑問から始まります．自分はあることについて知識を習得したと考えるよりも，まだ知るべきほどにもそれを知っていない，と考える方が健全でしょう．何であれ人はそれを知り尽くすことはないからです．

(ひらた　よしむつ／工学博士)

ひまわりの花

13世紀のイタリアの数学者レオナルド・フィボナッチによって紹介された数列，1，1，2，3，5，8，13，21，34，55，…，は並ぶ2つの数の和で次の数が与えられています．前後の数の比2/3，3/5，5/8…は，2つの数が大きくなるにつれてある数＝0.61803…に近づきます．この比は調和感や落ち着いた感じを与えるといわれ，縦横の寸法の比率で，黄金分割と呼ばれています．

らせん状の成長パターンを持つ植物の花はふつうフィボナッチ数で表わされる数の花びらを持っています．たとえば，キンポウゲは5枚，アカネグサは8枚，ナルトサワギクは13枚，ホウキグサは21枚，デイジーの一種は34枚，ネバリノギクは55枚ないし89枚です．

黄金分割で360°を分けたとき角度（約137.5°）を保ちながら，円を描いて1つ1つ種（小花）を配置してゆくと，互いに重なることなく，新しい部分が効率よく成長し，無駄なスペースを生じずに，らせん状にきれいに並んだヒマワリの種の配列パターンができあがります（Awake，Sep.2006）．

成長点のまわりに無駄なスペースを生じないように，新しい部分が効率よく成長してゆくこの植物のデザインには，高度な数学が使われています．美しさはそのひとつの結果です．